Iranian Journal of Field Crops Research
Vol. 17, No. 3, Fall. 2019, p. 427-439

نشریه پژوهشهای زراعی ایران
جلد ۱۷، شماره ۳، پاییز ۱۳۹۸، ص. ۴۳۹ -۴۲۷

اثر کود نیتروژن و تراکم بوته بر عملکرد کمی و کیفی کنجد با استفاده از طرح مرکب مرکزی

هدا لطیفی[۱]، سرور خرم دل[۲*]، مهدی نصیری محلاتی[۳]، جواد وفابخش[٤]، عبداله ملافیلابی[٥]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۲/۲۹
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۸/۲۲

چکیده

بهینه‌سازی نیتروژن و تراکم یکی از راهکارهای مدیریتی برای حفاظت از منابع و کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی محسوب می‌شود. مدل سطح پاسخ (RSM) مجموعه‌ای از تکنیک‌های آماری مورد استفاده برای بهینه‌سازی نهاده‌های تولید به‌شمار می‌آید. در این مطالعه، اثر کود نیتروژن و تراکم بوته کنجد با استفاده از طرح مرکب مرکزی (CCD) برای مدل سطح پاسخ بررسی شد. این آزمایش با ۱۳ تیمار و دو تکرار در مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد در سال زراعی ۹۵-۱۳۹۴ انجام شد. تیمارها بر اساس سطح پایین و بالای تراکم بوته (به‌ترتیب با ۱۰ و ۴۰ بوته در متر مربع) و نیتروژن (به‌ترتیب با صفر و ۱۰۰ کیلوگرم اوره در هکتار) تعیین شدند. ارتفاع بوته، اجزای عملکرد (شامل تعداد کپسول در بوته، تعداد دانه در کپسول و وزن هزار دانه)، عملکرد دانه، عملکرد بیولوژیک، شاخص برداشت، درصد روغن، عملکرد روغن، درصد پروتئین و عملکرد پروتئین به‌عنوان متغیر وابسته مورد اندازه‌گیری قرار گرفتند و تغییرات این متغیرها با استفاده از مدل رگرسیونی ارزیابی شد. به‌منظور ارزیابی کیفیت مدل برازش شده از آزمون عدم برازش استفاده شد. بسندگی مدل با استفاده از آنالیز واریانس مورد ارزیابی قرار گرفت. به‌طور کلی، معادله چند جمله‌ای درجه دوم کامل برای تعیین معنی‌داری مدل و اجزای مدل (خطی، درجه دو و اثر متقابل) مورد بررسی قرار گرفت.کیفیت مدل برازش شده با استفاده از ضریب تبیین (R^2) ارزیابی شد. نتایج نشان داد که اثر جزء خطی بر تمام صفات مورد مطالعه معنی‌دار بود. اثر جزء درجه دو کامل تمام صفات به‌جز شاخص برداشت، تعداد دانه در کپسول و وزن هزار دانه را به‌طور معنی‌داری تحت تاثیر قرار داد. اثر متقابل دو عامل نیتروژن و تراکم بوته تنها بر کارایی مصرف نیتروژن، ارتفاع بوته و تعداد کپسول در بوته و درصد پروتئین معنی‌دار بود. آزمون عدم برازش در مورد هیچ‌کدام از صفات معنی‌دار نشدکه این امر نشان‌دهنده برازش مطلوب مدل رگرسیون درجه دوکامل بود. بیشترین عملکرد دانه مشاهده شده و برازش شده به‌ترتیب برای تراکم ۲۵ بوته در متر مربع و ۵۰ کیلوگرم کود اوره در هکتار و تراکم ۲۵ بوته در متر مربع و ۱۰۰ کیلوگرم کود اوره در هکتار با ۱۳۲۰/۵۲ و ۱۲۷۲/۴۵ کیلوگرم در هکتار به‌ترتیب به‌دست آمد. بیشترین درصد روغن و درصد پروتئین مشاهده شده به‌ترتیب از تراکم ۱۰ بوته در متر مربع و عدم مصرف اوره (۴۶/۶۷ درصد) و ۴۰ بوته در متر مربع و ۱۰۰ کیلوگرم اوره در هکتار (۲۵/۳۱ درصد) حاصل شد و بالاترین مقادیر مشاهده شده این صفات به‌ترتیب مربوط به تراکم ۱۰ بوته در متر مربع و عدم مصرف اوره (۴۶/۴۹ درصد) و ۴۰ بوته در متر مربع و ۱۰۰ کیلوگرم اوره در هکتار (۲۵/۰۱ درصد) بود. به‌طور کلی، اثر تراکم بوته بر افزایش عملکرد در سطوح بالای کود نیتروژن افزایش یافت که به‌طور آشکار نشان‌دهنده اهمیت نیتروژن در بهبود عملکرد دانه کنجد می‌باشد. بهینه‌سازی میزان مصرف منابع با استفاده از طرح مرکب مرکزی می‌تواند به‌عنوان راهکاری مطلوب در تولید پایدار کنجد مد نظر قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: آزمون عدم برازش، تولید پایدار، مدل سطح پاسخ

مقدمه

بهبود کارآیی سامانه‌ها و افزایش کارآیی فرآیندها بدون افزایش هزینه دارای اهمیت بسیاری می‌باشد. روش مورد استفاده بدین منظور، بهینه‌سازی[۶] نامیده می‌شود. جهت تعیین حد بهینه عوامل کنترل‌کننده رشد، استفاده از مدل‌ها و روابط تجربی ریاضی امری اجتناب‌ناپذیر به‌نظر می‌رسد (Amini, 2007). به منظور دستیابی به عملکرد قابل قبول و کاهش هم‌زمان آلودگی‌های زیست‌محیطی، نهاده‌های مورد استفاده در مزرعه باید بر مبنای عملکرد مورد انتظار به‌صورت بهینه مصرف شوند. یکی از روش‌های آماری برای حصول مقادیر بهینه نهاده‌ها، استفاده از مدلسازی سطح پاسخ[۷] می‌باشد (Aslan, 2007; Kwak, 2005). مدل سطح پاسخ (RSM) مجموعه‌ای از تکنیک‌های آماری مورد استفاده برای بهینه‌سازی نهاده‌های تولید به‌شمار می‌آید (Box and Wilson, 1951; Wang

۱- دانشجوی دکتری بوم‌شناسی زراعی گروه اگروتکنولوژی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد
۲- دانشیار گروه اگروتکنولوژی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد
۳- استاد گروه اگروتکنولوژی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد
۴- استادیار بخش تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی خراسان رضوی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، مشهد، ایران
۵- استادیار گروه زیست فناوری مواد غذایی، مؤسسه پژوهشی علوم و صنایع غذایی، مشهد، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: khorramdel@um.ac.ir)
DOI: 10.22067/gsc.v17i3.72836

6- Optimization
7- Response-Surface Methodology

et al., 2007). مدل سطح پاسخ یک روش آماری برای بهینه‌سازی چند فاکتور است که با استفاده از ترکیب طرح‌های آزمایشی شرایط بهینه عوامل تولید را تعیین می‌کند (Dean and Voss, 2002). مراحل RSM به‌ترتیب شامل انتخاب متغیرهای مستقل و سطوح آنها، گزینش طرح آماری مناسب، پیش‌بینی و ارزیابی اعتبار مدل و ارائه گرافیکی مدل پیش‌بینی و تعیین سطح بهینه فاکتورهای تحت بررسی می‌باشد. عینی کردن رابطه پیش‌بینی شده مدل برازش شده را می‌توان به‌وسیله نمودار سطح پاسخ انجام داد. سطح پاسخ نموداری سه‌بعدی تئوریک است که رابطه میان پاسخ و متغیرهای مستقل را به نمایش درمی‌آورد.

طرح مرکب مرکزی (Central Composite Design) یکی از انواع طرح‌های آماری برای مدلسازی سطح پاسخ است که به‌عنوان جایگزینی مناسب برای آزمایشات فاکتوریل محسوب می‌شود. این طرح توسط باکس و ویلسون (Box and Wilson, 1951) مطرح و توسط باکس و هانتر (Box and Hunter, 1957) تکمیل گردید. با استفاده از طرح مرکب مرکزی می‌توان حداکثر اطلاعات را با استفاده از کمترین اجرا از طریق توزیع نقاط آزمایشی در محدوده مورد نظر استخراج کرد (Mansouri, 2014). طرح مرکب مرکزی به‌عنوان طرحی به‌منظور تعیین مقادیر متغیرهای مستقل برای توصیف تغییرات متغیر وابسته تعریف می‌شود. در این طرح میانگین سطوح فاکتورها به‌عنوان نقطه مرکزی درنظر گرفته می‌شود (Clarke *et al.*, 1997; Kalavathy *et al.*, 2009). کوچکی و همکاران (۱۳۹۲) طی آزمایشی در قالب طرح مرکب مرکزی به‌منظور تعیین بهینه میزان مصرف آب (۱۵۰۰ و ۴۰۰۰ مترمکعب)، کود نیتروژن (صفر و ۴۰۰ کیلوگرم کود اوره در هکتار) و تراکم (۵۰ و ۱۵۰ بوته در متر مربع) در کشت کلزا (*Brassica napus*) گزارش نمودند که افزایش سطوح آبیاری و کود باعث افزایش عملکرد دانه و تشدید تلفات نیتروژن گردید، در صورتی‌که افزایش تراکم باعث افزایش عملکرد شد و به دلیل افزایش جذب نیتروژن، کاهش تلفات آن را به دنبال داشت (Koocheki *et al.*, 2013). منصوری و همکاران (۱۳۹۳) با بررسی کود نیتروژن (۱۰۰ و ۳۰۰ کیلوگرم کود اوره در هکتار)، آبیاری (۱۵۰۰ و ۳۵۰۰ مترمکعب) و تراکم (۱۰ و ۱۸ بوته در مترمربع) در گیاه دارویی موسیر ایرانی با استفاده از طرح مرکب مرکزی دریافتندکه افزایش کود و سطوح آبیاری باعث افزایش عملکرد غده موسیر و تلفات نیتروژن گردید، درصورتی که افزایش تراکم باعث فزایش عملکرد و کاهش تلفات نیتروژن شد. در سناریوی اقتصادی- زیست‌محیطی به‌ترتیب معادل ۱۶۹ کیلوگرم کود اوره در هکتار، ۲۰۲۵ مترمکعب آب در هکتار و ۱۷/۷ بوته در مترمربع به‌دست آمد (Mansouri *et al.*, 2014). نصیری محلاتی و همکاران (۱۳۹۴) با بررسی اثر متقابل تراکم (۵۰ و ۲۵۰ بنه در مترمربع) و وزن بنه (کمتراز ۴ و ۸-۴ گرم) زعفران با استفاده از طرح مرکب مرکزی بیان داشتند که افزایش اندازه بنه و تراکم اثر مثبتی بر افزایش عملکرد اقتصادی، قطر بنه، تعداد بنه دختری، تعداد بنه اصلی، تعداد گل و وزن تر گل داشت (Nassiri Mahallati *et al.*, 2015).

با توجه به افزایش روزافزون جمعیت و تغییر در الگوی غذایی جوامع، مصرف روغن‌های گیاهی نیز در حال افزایش است. لذا با توجه به اینکه بخش زیادی از روغن مورد نیاز کشور از طریق واردات تأمین می‌گردد، افزایش تولید و کیفیت دانه‌های روغنی در داخل کشور بسیار حائز اهمیت می‌باشد (Mohajer, 2017). در بین گیاهان دانه روغنی، کنجد(*Sesamum indicum*) طی سالیان طولانی به‌صورت گسترده‌ای کشت و کار می‌شده است، اما امروزه همانند بسیاری از گیاهان زراعی دیگر نظیر یولاف (*Avena sativa*)، گندم سیاه (*esculentum Fagopyrum*) به دلایلی مثل توجه کمتر به اصلاح خصوصیات ژنتیکی، این گیاهان در مقایسه با گیاهان زراعی غالب بسیار کمتر مورد توجه بوده و لذا کشت و کار این گیاهان در معرض فراموشی قرار گرفته است (Rezvani Moghaddam, 2008). کنجد با نام علمی (*Sesamum indicum* L.) به دلیل محتوی بالای روغن در دانه (۶۰-۵۰ درصد) به‌عنوان ملکه گیاهان دانه روغنی شناخته شده است (Jefferson, 2003; Toan *et al.*, 2010).

نیتروژن یکی از عناصر پرمصرف و مؤثر در افزایش تولید گیاهان زراعی است همچنین یکی از مهمترین عناصر غذایی در نظام‌های تولید گیاهی محسوب می‌شود و تحقیقات انجام شده در این ارتباط، بازگوکننده این مطلب هستند که افزایش تولیدات کشاورزی در طی ۵۰ سال گذشته عمدتاً به‌دلیل کاربرد کودهای شیمیایی به‌ویژه کودهای نیتروژن بوده است (Laegreid *et al.*,1999; Maman *et al.*, 2003). اگرچه نیتروژن نقشی اساسی دردستیابی به عملکرد بالای کمی وکیفی در محصولات زراعی دارد، ولی به آسانی از خاک شسته شده و باعث بروز آلودگی آب‌های زیرزمینی می‌شود. حدود ۴۰ تا ۶۰ درصد کود نیتروژن اضافه شده به خاک از آن خارج می‌شود واین مقدار با افزایش کاربرد کود نیتروژن افزایش می‌یابد (Wenxue*et al.*, 2005). در آزمایشی روی بررسی اثرات مقادیر نیتروژن (۰، ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار) و زمان‌های مختلف مصرف نیتروژن بر خصوصیات کمی و کیفی کنجد، بهترین تیمار برای عملکرد مربوط به مصرف ۷۵ کیلوگرم نیتروژن در هکتار بود و بهترین زمان مصرف در دو مرحله پیش از کاشت و قبل از گلدهی توصیه گردید که افزایش عملکرد به افزایش تعداد کپسول در بوته و افزایش وزن هزار دانه نسبت داده شد (Garshasbi *et al.*, 2011).

یکی دیگر از عوامل مهم و تعیین‌کننده در عملکرد گیاهان زراعی تراکم بوته در واحد سطح است، چرا که در تراکم‌های بیش از تراکم مطلوب، بروز رقابت درون گونه‌ای باعث کاهش عملکرد شده و در تراکم‌های کمتر از حد مطلوب، از امکانات محیطی اعم از نور،

فضا، آب و خاک به نحو مطلوب استفاده نشده که در نهایت، سبب کاهش عملکرد می‌گردد (Martin and Deo, 2000). روی و همکاران (Roy *et al.*, 2009) در بررسی اثر فواصل بین ردیف مختلف (۱۵، ۳۰ و ۴۵ سانتی‌متر) بر عملکرد کنجد مشاهده کردند که عملکرد و اجزای عملکرد با افزایش فاصله بین بوته از ۱۵ به ۳۰ سانتی‌متر افزایش یافت. بالاسوبرامانیان و همکاران (Balasubramaniyan *et al.*,1995) گزارش کردند که تراکم بوته بر رشد و عملکرد کنجد تأثیر دارد، به طوری‌که تراکم زیاد موجب افزایش ارتفاع بوته و کاهش شاخه‌دهی و تعداد کپسول در بوته شد.

با توجه به آنچه گفته شد، هدف از اجرای این تحقیق بررسی اثر کود نیتروژن و تراکم بوته بر عملکرد کمی و کیفی کنجد با استفاده از طرح مرکب مرکزی در شرایط آب و هوایی مشهد بود.

مواد و روش‌ها

این آزمایش در سال زراعی ۹۵-۱۳۹۴ در مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد واقع در ۱۰ کیلومتری شرق مشهد با طول جغرافیایی ۵۹ درجه و ۲۸ دقیقه و عرض جغرافیایی ۳۶ درجه و ۱۵ دقیقه و ارتفاع ۹۸۵ متری از سطح دریا با دو تکرار اجرا شد. تعداد تیمارهای طراحی شده در طرح مرکب مرکزی با استفاده از رابطه (۱) محاسبه شد (Aslan, 2007; Box and Hunter, 1957).

$$t = 2^k + 2k + r \quad (۱)$$

در این معادله، k: نشان‌دهنده تعداد فاکتور و r: تعداد تکرار تیمار در سطح میانگین می‌باشد. بر این اساس، ترکیب تیمارهای آزمایشی با توجه به سطوح بالا و پایین تراکم (۱۰ و ۴۰ بوته در مترمربع) و سطوح بالا و پایین کود نیتروژن (۰ و ۱۰۰ کیلوگرم کود اوره در هکتار) با مطالعه مقالات درخصوص تاثیر فاکتورهای فوق بر روی گیاه کنجد تعیین شد (جدول ۱). نقطه مرکزی تیمارها (۲۵ بوته در مترمربع و ۵۰ کیلوگرم کود اوره در هکتار) پنج بارتکرار شد.

جدول ۱- ضرایب و مقادیر تیمارها بر اساس طرح مرکب مرکزی

Table 1- Rates and coefficients for treatments based on central composite design

سطح کود اوره Nitrogen ($kg.ha^{-1}$) fertilizer (تیمارها Treatments)	تراکم بوته Plant ($No.m^{-2}$) density (تیمارها Treatments)	X_2 (ضرایب* Coefficients*)	X_1 (ضرایب* Coefficients*)
0	10	-1	-1
0	40	-1	+1
100	10	+1	-1
100	40	+1	+1
50	10	0	-1
50	40	0	+1
0	25	-1	0
100	25	+1	0
50	25	0	0
50	25	0	0
50	25	0	0
50	25	0	0
50	25	0	0

X_1 و X_2: به‌ترتیب نشان‌دهنده متغیرهای مستقل نیتروژن و تراکم بوته هستند.

X_1 and X_2: indicate independent variables of nitrogen and plant density, respectively.

در مرحله آماده‌سازی زمین و پیش از کاشت، نمونه‌ای مرکب از خاک مزرعه از عمق ۳۰-۰ سانتی‌متری به‌صورت تصادفی تهیه و جهت تعیین خصوصیات فیزیکی و شیمیایی به آزمایشگاه ارسال شد. نتایج آزمون خصوصیات فیزیکوشیمیایی خاک در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه

Table 2- Physical and chemical properties of soil

بافت Texture	اسیدیته pH	هدایت الکتریکی EC ($dS.m^{-1}$)	کربن آلی Organic carbon (%)	نیتروژن N (%)	فسفر P (ppm)	پتاسیم K (ppm)
لوم سیلتی	7.92	0.58	0.62	0.058	29.2	186

بذر مورد استفاده جهت کاشت قبل از شروع آزمایش از مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی خراسان رضوی تهیه شد. بذر لاین شماره پنج، در گروه متوسط رس قرار دارد. این لاین، چند شاخه، کم‌کرک، بذر قهوه‌ای رنگ و محتوی روغن حدود ۴۹ درصد می‌باشد. پس از آماده‌سازی زمین، عملیات کاشت دستی در ۴ خرداد ماه در عمق ۳-۲ سانتی‌متری انجام شد.کود نیتروژن مصرفی (به‌صورت کود اوره با ۴۶ درصد نیتروژن) برای هر کرت و بر اساس جدول ۱ به سه قسمت مساوی تقسیم شد که یک سوم آن در زمان کاشت اعمال گردید. بخش دوم کود نیتروژن یک ماه پس از کاشت (در مرحله استقرار) و بخش سوم، دو ماه پس از کاشت (در مرحله گلدهی) توزیع شد.

اولین آبیاری بلافاصله بعد از کاشت و آبیاری‌های بعدی تا پایان رشد محصول، به شیوه نشتی و با استفاده از سیفون به‌صورت هفتگی انجام شد. به‌منظور جلوگیری از اختلاط اثر تیمارهای کودی، انتهای کرت‌ها مسدود و آبیاری کرت‌ها به‌صورت جداگانه انجام شد. وجین علف‌های هرز از هفته سوم و به‌صورت مستمر و تا بسته شدن کانوپی گیاهان، به‌صورت دستی انجام شد. برای حصول تراکم نهایی در هر کرت، تنک شدن در سه مرحله پس از استقرار بوته‌ها و حصول

اطمینان از سبز شدن مناسب بوته‌ها انجام گردید. برای اندازه‌گیری اجزای عملکرد (شامل تعداد کپسول در بوته، تعداد دانه در کپسول و وزن هزار دانه) از هر کرت در انتهای فصل رشد و همزمان با رسیدگی بوته‌ها، ۵ بوته به‌صورت تصادفی در هر کرت انتخاب و صفات فوق‌الذکر شمارش و ثبت شد. برداشت محصول در مرحله رسیدگی کپسول‌ها و همزمان با زرد شدن بوته‌ها در ۱۱ مهرماه انجام شد. پس از حذف حاشیه‌های نیم‌متری کرت‌ها، برداشت از سه متر مربع (۲×۱/۵ متر) انتهای هر کرت انجام شد. در هنگام برداشت، در سطح مذکور کلیه بوته‌ها از محل طوقه توسط داس جدا شد. پس از خشک شدن بوته‌ها، دانه با استفاده از الک از کاه و کلش، کاملاً جدا و تمیز شد. دانه‌های برداشت شده به‌طور جداگانه با ترازوی دقیق توزین شدند. جهت اندازه‌گیری درصد روغن دانه از دستگاه سوکسله استفاده شد. عملکرد روغن نیز از حاصلضرب عملکرد دانه در درصد روغن هر تیمار محاسبه گردید. برای تعیین نیتروژن و پروتئین خام از دستگاه میکروکجلدال خودکار استفاده شد. سپس نیتروژن دانه در ضریب ۶/۲۵ ضرب شد و عدد حاصل به‌عنوان پروتئین مد نظر قرار گرفت (AOAC, 1990). عملکرد پروتئین از حاصلضرب عملکرد دانه در درصد نیتروژن دانه هر تیمار به‌دست آمد.

به‌منظور انتخاب مدل مناسب، مدل درجه دو کامل[1] به همراه اجزای آن (خطی، درجه ۲ و اثر متقابل) با اثرات متقابل بین فاکتورها برازش داده شد (رابطه ۲). سپس بر اساس معیارهای آماری تجزیه رگرسیون (مقادیر F، P و R^2) و آزمون عدم برازش[2] بهترین مدل انتخاب و از این مدل برای بهینه‌سازی استفاده گردید (Koocheki *et al.*, 2016; Koocheki *et al.*, 2013).

$$Y=a_0+a_1x_1+a_2x_2+a_3x_1^2+a_4x_2^2+a_5x_1x_2 \quad (۲)$$

در این معادله، Y: متغیر وابسته (که پاسخ به عملکرد دانه، بیولوژیک و سایر صفات تحت بررسی بودند)، x_1: متغیر مستقل کود نیتروژن، x_2: متغیر مستقل تراکم و a_1 تا a_5: ضرایب معادله می‌باشند.

در نهایت، نتایج پیش‌بینی با داده‌های مشاهده شده مورد مقایسه قرار گرفتند و اعتبار مدل‌های رگرسیون با استفاده از جذر میانگین مربعات خطا[3] انجام شد (رابطه ۳).

$$\text{RMSE}\ (\%) = \frac{100}{\bar{O}} * \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(P_i-O_i)^2}{n}} \quad (۳)$$

که در این معادله، $\bar{O}$: میانگین مشاهدات، P_i: مقادیر پیش‌بینی شده و O_i: مقادیر مشاهده شده می‌باشد.

RMSE به‌صورت درصد اختلاف نسبی مقادیر پیش‌بینی شده در برابر مقادیر واقعی بیان می‌شود و براساس تعریف، قدرت پیش‌بینی مدل در صورتی‌که RMSE کمتر از ۱۰ درصد باشد، عالی، بین ۱۰ تا ۲۰ درصد، خوب، بین ۲۰ تا ۳۰ درصد، متوسط و بالاتر از ۳۰ درصد، ضعیف برآورد می‌شود (Koocheki *et al.*, 2016).

در نهایت، مقادیر بهینه کاربرد کود نیتروژن و تراکم کاشت کنجد برای حصول پاسخ عملکرد دانه و درصد روغن مورد بررسی قرار گرفت.

جهت تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها و رسم نمودارها از نرم‌افزار Minitab ver.17 استفاده شد.

نتایج و بحث

نتایج تجزیه واریانس مدل رگرسیونی درجه دو کامل برای هر کدام از متغیرهای وابسته شامل عملکرد دانه، عملکرد بیولوژیک، درصد روغن، عملکرد روغن، عملکرد پروتئین، اجزای عملکرد شامل تعداد کپسول در بوته، تعداد دانه در کپسول و وزن هزار دانه کنجد در جدول ۳ ارائه شده است.

نتایج نشان داد که اثر خطی بر تمام صفات مورد مطالعه معنی‌دار بود. اثر جزء درجه دو کامل تمام صفات به‌جز تعداد دانه در کپسول و وزن هزار دانه را به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر قرار داد. اثر متقابل دو عامل نیتروژن و تراکم بوته تنها بر تعداد کپسول در بوته و درصد پروتئین معنی‌دار بود. آزمون عدم برازش در مورد هیچ‌کدام از صفات معنی‌دار نشد که این امر نشان‌دهنده برازش مطلوب مدل رگرسیون درجه دو کامل می‌باشد. مقدار پایین RMSE نشان‌دهنده برازش خوب مدل می‌باشد (جدول ۳).

آنالیز رگرسیون و ضریب تبیین برای برازش روابط بین متغیرهای نیتروژن و تراکم بوته با هریک از متغیرهای وابسته در جدول ۴ ارائه شده که نمودارهای سطح پاسخ بر اساس این ضرایب به‌دست آمده است.

مقادیر پیش‌بینی شده و مشاهده شده عملکرد دانه، عملکرد بیولوژیک، درصد روغن، عملکرد روغن، عملکرد پروتئین، اجزای عملکرد شامل تعداد کپسول در بوته، تعداد دانه در کپسول و وزن هزار دانه کنجد در جدول ۵ نشان داده شده است.

نتایج سطح پاسخ اثر تراکم بوته و نیتروژن بر اجزای عملکرد نشان داد که با افزایش تراکم، موجب کاهش تعداد کپسول در بوته، تعداد دانه در بوته و وزن هزار دانه گردیده است. همچنین با افزایش تراکم تا ۲۵ بوته در مترمربع، عملکرد دانه ابتدا افزایش و سپس کاهش یافت (شکل ۱).

نتایج نشان داد بیشترین عملکرد دانه مشاهده شده و پیش‌بینی شده با ۱۳۲۰/۵۲ و ۱۲۷۲/۴۵ کیلوگرم در هکتار به‌ترتیب برای تراکم ۲۵ بوته در متر مربع و ۵۰ کیلو گرم کود اوره در هکتار و تراکم ۲۵ بوته در متر مربع و ۱۰۰ کیلوگرم کود اوره در هکتار به‌دست آمد و کمترین عملکرد دانه مشاهده شده و پیش‌بینی شده ۹۰۴/۵۵ و

1- Full quadratic regression
2- Lack of-fit
3- RMSE: Root mean square error

۹۱۰/۶۸ کیلوگرم در هکتار برای تراکم ۴۰ بوتـه در متـر مربـع و ۵۰ کیلو گرم کود اوره در هکتار به‌دست آمد (جدول ۵).

جدول ۳-نتایج تجزیه واریانس میانگین مربعات مدل رگرسیونی درجه دو کامل

Table 3- Analysis of variance of the full quadratic regression model

منابع تغییر S.O.V.	درجه آزادی d.f	عملکرد بیولوژیک Biological yield	عملکرد دانه Seed yield	وزن هزار دانه 1000-seed weight	تعداد دانه در کپسول Seed number per capsule	تعداد کپسول در بوته Capsule number per plant	درصد روغن Oil percentage	عملکرد روغن Oil yield	درصد پروتئین Protein content	عملکرد پروتئین Protein yield
مدل Model	6	915263**	79835**	0.145556**	14.6200**	1547.62**	13.3280**	17780.3**	5.6696**	5761.5**
تکرار Replication	1	66ns	1100ns	0.006154ns	0.1538ns	0.15ns	12.2547**	2759.6*	0.0424ns	41.3ns
خطی Linear	2	1565937**	147573**	0.416667**	42.0833**	4439.08**	23.7513**	44089.2**	9.0135**	5686.3**
تراکم Density	1	3044012**	292459**	0.270000**	14.0833**	8694.08**	31.7092**	87680.7**	8.9269**	9121.5**
نیتروژن Nitrogen	1	87862ns	2688ns	0.563333**	70.0833**	184.08**	15.7934**	497.6ns	9.1002**	2251**
درجه ۲ Square	2	1175793**	91121**	0.011300ns	1.6373ns	200.63**	9.9646**	7871.6**	7.4041**	11349.3**
تراکم× تراکم Density× Density	1	2100814**	166720**	0.21281ns	3.2516ns	357.34**	18.9052**	14361.1**	14.3781**	21070.7**
نیتروژن× نیتروژن Nitrogen× Nitrogen	1	7948ns	1628ns	0.007947ns	0.2993ns	1.15ns	0.5195ns	127.2ns	0.7026ns	323.8ns
اثر متقابل Interaction	1	8052ns	519ns	0.011250ns	0.1250ns	6.13*	0.2813ns	0.9ns	1.1400*	456.6ns
تراکم × نیتروژن Density × Nitrogen	1	8052ns	519ns	0.011250ns	0.1250ns	6.13*	0.2813ns	0.9ns	1.1400*	456.6ns
خطا Error	19	31012	3026	0.010796	0.7597	0.93	0.5875	603.2	0.2243	219.6
عدم برازش Lack of-fit	11	36218ns	3859ns	0.014284ns	0.6940ns	1.03ns	0.6185ns	747.8ns	0.1504ns	254.4ns
خطای خالص Pure error	8	23854	1880	0.006000	0.8500	0.8	0.5449	404.3	0.3261	171.8
RMSE (%)	—	2.37	2.72	2.47	1.92	0.59	0.99	2.78	1.51	3.28

ns، * و **: به‌ترتیب نشان‌دهنده غیرمعنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد و یک درصد است.

ns, * and ** represent non-significant and significant at 5 and 1% probability levels, respectively.

جدول ٤- ضرایب رگرسیون و تبیین برای مدل درجه دو کامل: $Y=a_0+a_1x_1+a_2x_2+a_3x_1^2+a_4x_2^2+a_5x_1x_2$

Table 4- Regression coefficients and R^2 for full quadratic model: $Y=a_0+a_1x_1+a_2x_2+a_3x_1^2+a_4x_2^2+a_5x_1x_2$

	مقادیر ضرایب Coefficient values						R^2
	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	
عملکرد بیولوژیک Biological yield	2793	105.6	1.25	-2.741	0.0152	-0.0423	90.31
عملکرد دانه Seed yield	1006.5	28.74	-0.12	-0.772	0.00687	-0.0107	89.28
وزن هزار دانه 1000-seed weight	2.940	0.0063	0.00407	-0.000276	0.000015	-0.000050	80.98
تعداد دانه در کپسول Seed number per capsule	29.14	0.1066	0.0432	-0.00341	0.000093	-0.000167	85.87
تعداد کپسول در بوته Capsule number per plant	104.17	-0.654	0.0309	-0.03575	0.000183	0.001167	99.81
درصد روغن Oil percentage	50.983	-0.532	-0.0169	0.00822	-0.000123	0.000250	87.75
عملکرد روغن Oil yield	532.9	5.61	-0.332	-0.2266	0.00192	0.0005	89.23
درصد پروتئین Protein content	17.846	0.4412	0.0157	-0.007170	0.000143	-0.000503	88.86
عملکرد پروتئین Protein yield	164.9	12.39	0.22	-0.2745	0.00306	-0.01007	89.23

X_1 و X_2: به‌ترتیب نشان‌دهنده متغیرهای مستقل تراکم بوته و نیتروژن هستند.

X_1 and X_2: indicate independent variables of nitrogen and plant density, respectively.

جدول ٥- مقایسه مقادیر پیش‌بینی شده و مشاهده شده عملکرد کنجد تحت تأثیر سطوح نیتروژن و تراکم بوته

Table 5- Comparison of observed and predicted values of sesame yield as affected by nitrogen and plant density levels

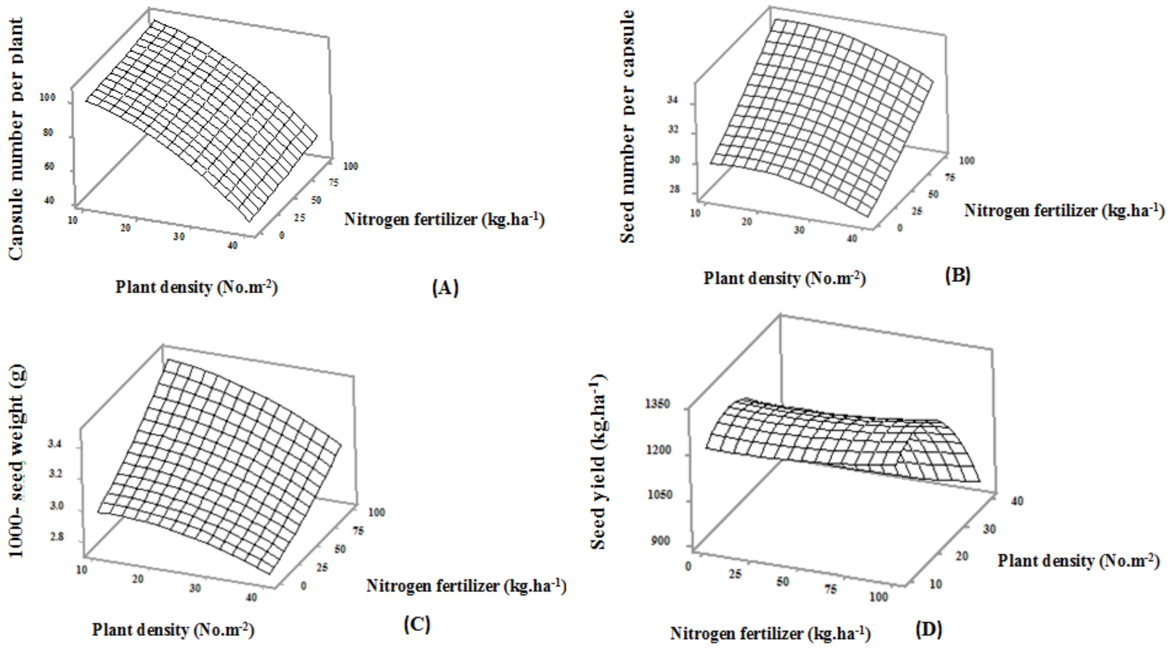
تیمار Treatment		عملکرد بیولوژیک Biological yield (kg.ha⁻¹)		عملکرد دانه Seed yield (kg.ha⁻¹)		وزن هزار دانه 1000-seed weight (g)		تعداد دانه در کپسول Seed number per capsule		تعداد کپسول در بوته Capsule number per plant		درصد روغن Oil percentage		درصد پروتئین Protein percentage	
X_1	X_2	مشاهده شده Observed	پیش‌بینی شده Predicted	مشاهده شده Observed	پیش‌بینی شده Predicted	مشاهده شده Observed	پیش‌بینی شده Predicted	مشاهده شده Observed	پیش‌بینی شده Predicted	مشاهده شده Observed	پیش‌بینی شده Predicted	مشاهده شده Observed	پیش‌بینی شده Predicted	مشاهده شده Observed	پیش‌بینی شده Predicted
10	0	3574.11	3574.9	1231.62	1216.7	3	2.98	30.5	29.87	100	99.94	46.67	46.49	21.32	21.54
40	0	2611.21	2631.4	913.92	920.9	2.65	2.75	28	27.95	44	44.35	43	42.86	23.97	24.02
10	100	3850.66	3809.6	1296.55	1262.7	3.55	3.48	35.5	34.95	106	106	43.68	43.82	24.17	24.04
40	100	2760.85	2739.2	946.62	934.8	3.05	3.11	32.5	32.53	53.5	53.94	40.77	40.94	25.31	25.01
10	50	3612.64	3654.25	11731.61	1222.53	3.1	3.19	31	32.17	102.5	102.5	45.41	45.46	22.52	22.43
40	50	2643.43	2647.3	904.55	910.68	3.05	2.89	30	30.01	49.5	48.69	42.24	42.2	23.92	24.16
25	0	3739.06	3719.88	1233.89	1242.5	3	2.93	29	29.67	80.5	80.19	42.5	42.82	24.67	24.39
25	100	3826.28	3891.13	1226.07	1272.45	3.35	3.36	34	34.51	88.5	88.03	40.83	40.53	25.71	26.14
25	50	3733.74	3767.5	1232.13	1240.3	3.1	3.1	32.5	31.86	83	83.65	40.89	41.98	25.84	24.91
25	50	3999.64	3767.5	1320.52	1240.3	3.05	3.1	32.5	31.86	83.5	83.65	41.87	41.98	24.99	24.91
25	50	3742	3767.5	1222	1240.3	3.05	3.1	32.5	31.86	83.5	83.65	42.57	41.98	24.78	24.91
25	50	3791.5	3767.5	1243.4	1240.3	3.05	3.1	31	31.86	84.5	83.65	41.93	41.98	24.82	24.91
25	50	3611.92	3767.5	1237	1240.3	3.05	3.1	32	31.86	83	83.65	42.66	41.98	24.29	24.91

X_1 و X_2: به‌ترتیب نشان‌دهنده متغیرهای مستقل تراکم (بوته در مترمربع) و نیتروژن (کود اوره در هکتار) هستند.

X_1 and X_2: indicate independent variables such as nitrogen and plant density, respectively.

همچنین نتایج نشان داد اثر نیتروژن بر عملکرد معنی‌دار نشد، اما اجزای عملکرد را به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر قرار داد و در بین اجزای عملکرد فقط اثرات متقابل کود نیتروژن و تراکم بر تعداد کپسول در بوته معنی‌دار شد (جدول ۳). نتایج سطح پاسخ اجزای عملکرد به تراکم بوته و نیتروژن نشان داد که با افزایش مصرف نیتروژن این صفات افزایش یافت (شکل ۱). نتایج احمدی و بحرانی (Ahmadi and Bahrani, 2009) نشان داد که تأثیر نیتروژن بر عملکرد و اجزای عملکرد کنجد به‌جز وزن هزار دانه معنی‌دار بود. کاربرد بیش از حد از نیتروژن باعث کاهش کارایی مصرف نیتروژن می‌شود. گزارش شده است که کمتر از ۳۳ درصد نیتروژن مصرفی

توسط گیاه جذب می‌شود، در حالی‌که باقیمانده از دسترس خارج شده و باعث تشدید بروز آلودگی‌های زیست‌محیطی نظیر انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌شود (Shindo *et al.*, 2009).

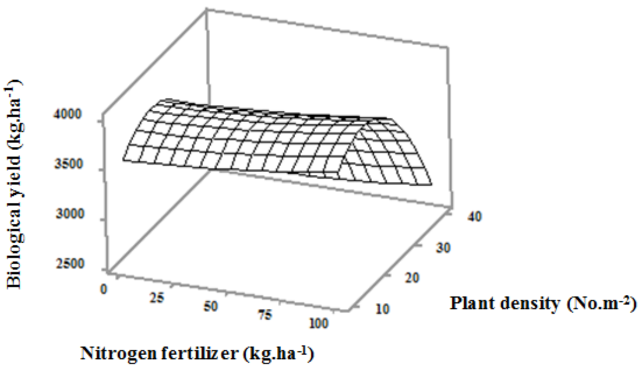


شکل ۱- مدل سطح پاسخ تعداد کپسول در بوته (الف)، تعداد دانه در کپسول (ب)، وزن هزار دانه (ج) و عملکرد دانه (د) کنجد تحت تأثیر سطوح تراکم و کود نیتروژن

Figure 1- Response surface model for capsule number per plant (A), seed number per capsule (B), 1000-seed weight (C) and seed yield (D) of sesame affected as plant density and nitrogen fertilizer

نتایج نشان داد بیشترین عملکرد بیولوژیک مشاهده شده و پیش‌بینی شده به‌ترتیب با ۳۹۹۹/۶۴ و ۳۸۹۱/۱۳ کیلوگرم در هکتار در تراکم ۲۵ بوته در متر مربع و ۵۰ کیلوگرم کود اوره در هکتار و تراکم ۲۵ بوته در متر مربع و ۱۰۰ کیلوگرم کود اوره در هکتار به‌دست آمد (جدول ۵). نتایج سطح پاسخ عملکردبیولوژیک به تراکم بوته و نیتروژن نشان داد با افزایش تراکم تا ۲۵ بوته در متر مربع، عملکرد بیولوژیک ابتدا افزایش و سپس کاهش یافت ولی افزایش مصرف نیتروژن، بهبود عملکرد بیولوژیک را موجب گردید (شکل ۲).

نتایج به‌دست آمده برای عملکرد بیولوژیک مشابه عملکرد دانه است، به‌نظر می‌رسد در تراکم ۲۵ بوته در مترمربع که شرایط بهتری برای رشد بوته‌ها اعم از نور، فضا و عناصر غذایی فراهم شده است که در نتیجه نسبت به تراکم‌های بالاتر شاخه‌زایی مطلوب‌تری انجام شده و موجب افزایش عملکرد بیولوژیک بالاتر شده است. همچنین افزایش مصرف کود اوره تا ۵۰ کیلوگرم در هکتار به دلیل تحریک رشد رویشی باعث افزایش عملکرد بیولوژیک گردید.



شکل ۲- مدل سطح پاسخ عملکرد بیولوژیک کنجد تحت تأثیر سطوح تراکم و کود نیتروژن

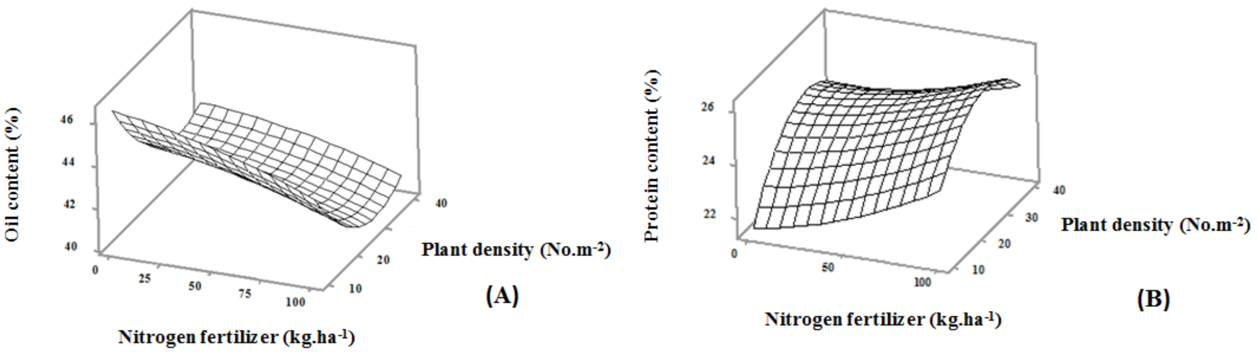
Figure 2- Response surface model for biological yield of sesame affected as plant density and nitrogen fertilizer

رضوانی مقدم و همکـاران (۱۳۸۴) گـزارش کردنـد کـه افـزایش تراکم کنجد از ۲۰ به ۵۰ بوته در مترمربع تـأثیر معنـی‌داری بـر مـاده خشک تک بوته داشت؛ به‌طوری‌که با افزایش تراکم، ماده خشک تک بوته کاهش یافت (Rezvani Moghaddam, 2008). قـوش و پـاتر (Ghosh and Patar, 1994) و اوسی بانسـو (OseiBonsu, 1977) نیز طی مطالعات مختلف روی اثر تراکم در کنجـد بیـان داشـتند کـه بیشترین میزان ماده خشک تک بوته در تراکم‌های پایین به‌دست آمد. آن‌ها علت این امر را وجود رقابت شدید بین گیاهان، کاهش دسترسی به منابع، کاهش فتوسنتز و در نتیجه کـاهش تولیـد مـاده خشـک در تراکم‌های بالا ذکر کردند. کالسیکان و همکاران (Caliskan *et al.*, 2004)، چیمانشیت و دوبل (Chimanshette and Dhoble, 1992) و ماجومادر و روی (Majumdar and Roy, 1992) گـزارش نمودنـد که در کنجد با افزایش تراکم بوته در واحد سطح، عملکرد دانه افزایش پیدا کرده، نتایج این آزمایش نیز نشان داد که با افزایش تـراکم از ۱۰ به ۲۵ بوته در مترمربع عملکرد دانه افزایش و سپس با افزایش بیشـتر تراکم، مقدار آن کاهش یافت که با نتایج تحقیقات بهروز و همکـاران (Behrooz *et al.*, 2010) مطابقت نداشت. بیشترین عملکرد دانه در آزمایشات فوق در تراکم‌های ۴۰ و ۵۰ بوته در متر مربع به‌دسـت آمـد امـــا بـــا نتیجـــه تحقیـــق پـــاپری مقـــدم فـــرد و بحرانـــی (PapariMoghaddam Fard and Bahrani, 2005) که تراکم‌های ۱۰، ۱۶/۶ و ۲۵ بوته در مترمربع را مورد آزمایش قرار دادند، مطابقـت داشت. همچنین شـارما و همکـاران (Sharma, 2005) نیـز گـزارش نمودند که بین تراکم‌های ۳۰۰ و ۶۰۰ هزار بوتـه در هکتـار اخـتلاف معنی‌داری در عملکرد دانه کنجد به وجود نیامد. رقـم کشـت شـده در تحقیق حاضر رقم چند شاخه است که احتمالاً در تراکم‌های کمتر بـه دلیل وجود فضای کافی رشد رویشی بیشتری صـورت گرفتـه و مـاده خشک بیشتری برای شاخه‌زایی در اختیار گیاه قرار می‌گیرد. همچنـین در تراکم‌های پایین، رقابت کمتری برای جـذب آب و عناصـر غـذایی بین بوته‌ها وجود دارد. از سوی دیگر، در تراکم‌های کم به دلیل رقابت کمتر و نفوذ نور بیشتر، گل‌های بیشتری تبدیل به کپسـول شـده و در نهایت، تعداد کپسول باقی‌مانده در زمان برداشت نیز بیشتر گردیـد. در تراکم‌های بالا نفوذ نور به درون کانوپی کاهش یافته که سبب ایجـاد محدودیت در نفوذ نور به پایین بوته گردید و بنابراین، تعـداد کمتـری کپسول در گره‌های پایین گیاه تشکیل شده و گاهی گـره‌هـای پـایین بدون کپسول بودند. در تراکم ۲۵ بوتـه در مترمربـع، فضـای کـافی و مطلوبی برای رشد و ایجـاد شـاخه فـراهم شـد و موجـب گـردد کـه بیشترین عملکرد حاصل گردد.

نتایج سطح پاسخ درصد روغن کنجد به تـراکم بوتـه و نیتـروژن نشان داد که با افزایش تـراکم، درصـد روغـن ابتـدا کـاهش، سـپس افزایش یافت ولی با افزایش نیتروژن، درصد روغن روند کاهشی نشان داد (شکل ۳- الف). نتایج سطح پاسخ درصد پروتئین کنجد به تـراکم بوته و نیتروژن نشان داد با افزایش تراکم درصـد پـروتئین افـزایش و سپس کاهش یافت و با افزایش میزان مصرف نیتروژن روند افزایشـی برای درصد پروتئین مشاهده شد (شکل ۳- ب). همچنین نتایج نشان داد بیشترین درصد روغن مشاهده شده و پیش‌بینی شده به‌ترتیـب بـا ۴۶/۶۷ و ۴۶/۴۹ درصد در تراکم ۱۰ بوته در متر مربع و عدم مصـرف نیتروژن به‌دسـت آمـد و بیشـترین درصـد پـروتئین مشـاهده شـده و پیش‌بینی شده به‌ترتیب با ۲۵/۳۱ و ۲۵/۰۱ درصد در تـراکم ۴۰ بوتـه در مترمربع و ۱۰۰ کیلوگرم کود اوره در هکتار حاصل شد (جدول ۵) و اثر متقابل تراکم و کود نیتروژن بر درصد پروتئین معنی‌دار بود (جدول ۳).

آن‌چنان‌که انتظار می‌رود در اثـر افـزایش کـود نیتـروژن، درصـد روغن کاهش یافت چرا که با کـاربرد نیتـروژن درصـد پـروتئین دانـه افزایش می‌یابد و کاربرد نیتروژن باعث ورود ترکیبات نیتروژنه (نظیـر آمیدها و آمین‌ها) بیشتری به بذر شده که برای تولیـد پـروتئین‌هـا بـا استفاده از اسکلت کربنی حاصل از ساکارز مورد استفاده قرارمی‌گیرد و در نتیجه کربن کمتری برای تولید روغن در دانه بـاقی مـی‌مانـد کـه باعث کاهش درصد روغن دانـه مـی‌شـود (Babaei Abarghouei, 2016). نتـایج حقانیـان و همکـاران (Haghanian *et al.*, 2016) و شارما (Sharma *et al.*, 1998) بر روی گیاه کنجد و نتایج چائوهـان و همکاران (Chauhan *et al.*, 1993) بر روی گیاه کلـزا مویـد ایـن مطلب است.

مقادیر بهینه کاربرد کود نیتروژن و تـراکم کاشـت کنجـد بـرای حصول پاسخ عملکرد دانه و درصد روغن مورد بررسـی قـرار گرفـت. نتایج به‌دست آمده نشان داد که کاربرد ۲۲ کیلوگرم کود اوره در هکتار و تراکم ۱۴ بوته در متر مربـع باعـث تولیـد ۱۲۵۰ کیلـوگرم دانـه در هکتار با ۴۲ درصد روغن می‌شود. مقدار شاخص مطلوبیت بهینه سازی ($0<DI\leq1$) یک به‌دست آمد که نشان‌دهنده نتایج قابل قبـولی بـرای سطوح پاسخ تحت تأثیر متغیرهای مستقل می‌باشد. لازم به ذکر است که هرچه این شاخص به یک نزدیکتر باشد نشان‌دهنده دقـت بـالای مدل در شبیه‌سازی مقدار متغیرهـای وابسـته تحـت تـأثیر متغیرهـای مستقل می‌باشد (Kalavathy *et al.*, 2009).



شکل ۳- مدل سطح پاسخ درصد روغن (الف) و درصد پروتئین (ب) کنجد تحت تأثیر سطوح تراکم و کود نیتروژن

Figure 3- Response surface model for Oil content (A) and Protein content (B) of sesame affected as plant density and nitrogen fertilizer

نتیجه‌گیری

برای دستیابی به تولید پایدار محصولات زراعی، توجه به اصول اولیه بهبود مدیریت انرژی، کارایی مصرف منابع و جلوگیری از هدر رفت نهاده‌ها بر مبنای استفاده از مدل‌های آماری همچون طرح مرکب مرکزی امری اجتناب‌ناپذیر به‌نظر می‌رسد. نتایج این مطالعه روی اثر کود نیتروژن و تراکم بوته بر عملکرد کمی و کیفی کنجد با استفاده از طرح مرکب مرکزی نشان داد که بیشترین عملکرد دانه (۱۳۲۰/۵۲ کیلوگرم در هکتار) در تراکم ۲۵ بوته در مترمربع و مصرف ۵۰ کیلوگرم کود اوره در هکتار به‌دست آمد که به‌نظر می‌رسد در این تراکم پوشش گیاهی توانسته از نور خورشید، آب و کود اوره مصرف شده، بیشترین استفاده را نماید و همچنین با توجه به رشد کُند کنجد در مراحل اولیه رشد، گیاه کنجد در تراکم مذکور توانسته بر رشد علف‌های‌هرز پیشی گرفته و استفاده مناسبی از منابع نموده است.

همچنین مصرف بیش از مقادیر ذکر شده نهاده‌ها برای حصول بالاترین عملکرد دانه و روغن کنجد (تراکم ۲۵ بوته در مترمربع و ۵۰ کیلوگرم کود اوره در هکتار البته با توجه به نیتروژن موجود در خاک مزرعه) فقط باعث افزایش هزینه‌ها و آلودگی زیست‌محیطی می‌گردد.

همچنین بر مبنای نتایج بهینه‌سازی کاربرد کود نیتروژن و تراکم کاشت کنجد برای حصول پاسخ بررسی و عملکرد دانه و محتوی روغن دانه به‌عنوان شاخص اقتصادی، به نظر می‌رسد مصرف منابع با توجه به مقادیر بهینه‌سازی شده می‌تواند به‌عنوان مناسب ترین سطوح مصرف کود نیتروژن و تراکم بوته با توجه به شرایط مطالعه شده در نظر گرفته شوند و کاربرد ۲۲ کیلوگرم کود اوره در هکتار و تراکم ۱۴ بوته در مترمربع باعث تولید ۱۲۵۰ کیلوگرم دانه در هکتار با ۴۲ درصد روغن می‌شود.

References

1. Ahmadi, M., and Bahrani, M. 2009.Effect of nitrogen fertilizer on yield and yield components of three sesame cultivars in Bushehr province. Journal of Science and Technology of Agriculture and Natural Resources 48: 123-131. (in Persian with English abstract).
2. Amini, M. 2007. Optimization the conditions for extraction of hydrocolloid compounds of Ballengo-Shirazi seed and studying the effect of its addition on rheological properties and bulk bread quality compared to Gazanthan gum. M.Sc. Thesis, College of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad. Iran. (in Persian with English abstract).
3. AOAC. 1990. Official methods of analyses. Association of Official Analytical Chemists: Washington, DC.
4. Aslan, N. 2007.Application of response surface methodology and central composite rotatable design for modeling the influence of some operating variables of a Multi-ravity Separator for coal cleaning. Fuel 86: 769-776.
5. Babaei Abarghouei, G. H. 2016. Effects of sowing date and integrative nitrogen application on nitrogen efficiency, yield and quality criteria of sesame. Ph.D. Thesis, College of agriculture, University of Ferdowsi. Mashhad. Iran. (in Persian with English abstract).
6. Balasubramaniyan, P., Gnanamurthy, P., and Dharmalingam, V. 1995.Response of irrigated sesame varieties to planting density and nitrogen. Sesame and Safflower Newsletter 10: 59-6.
7. Behrooz, Z., Khodabandeh, N., Madani, H., and Shirzadi, M. H. 2010. Study of bush accumulation and division of nitrogen fertilizer on agronomic characteristic of local sesame Jiroft area. New Finding in Agriculture 4 (2): 91-99. (in Persian with English abstract).
8. Box, G. E. P., and Hunter, J. S. 1957. Multi-factor experimental designs for exploring response surfaces. The Institute of Mathematical Statistics. p. 195-241.

9. Box, G. E. P., and Wilson, K. B. 1951.On the experiment attainment of optimum conditions. Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Statistical Methodology) 13: 1-45.
10. Caliskan, S., Arslan, M., Arioglu, H., and Isler, N. 2004.Effect of planting method and plant population on growth and yield of sesame in a Mediterranean type of environment. Asian Journal of Plant Sciences 3: 610-613.
11. Chauhan, A. K., Manak, S., and Daolhowal, B. K. 1993. Effect of nitrogen level and row spacing of performance of rape (*Brassica napus* L.). Indian Journal of Agricultural Sciences 37: 851-853.
12. Chimanshette, T., and Dhoble, M. 1992. Effect of sowing date and plant density on seed yield of sesame varieties. Indian Journal of Agronomy 37: 280-282.
13. Clarke, G. M., and Kempson, R. E. 1997. Introduction to the Design and Analysis of Experiments. Arnold, London. 334p.
14. Dean, A., and Voss, D. 2002. Design and Analysis of Experiments. Springer Texts in Statistics. New York.
15. Garshasbi, M., Dadnia, M. R., and Rafie, M. R. 2011.Evaluating the effects of amounts and different times of nitrogen consumption on quantitative and qualitative traits in sesame (*Sesamum indicum* L.) in Behbehan Province. Crop Physiology Journal 9 (3): 95-123. (in Persian with English abstract).
16. Ghosh, D. C., and Patar, A. K. 1994. Effect of plant density and fertility levels on productivity and economic of summer sesame. Indian Journal of Agronomy 39: 71-75.
17. Haghanian, S., Yadavi, A., Balouchi, H. R., and Moradi, A. 2016. Grain, oil yield and nitrogen use efficiency in different varieties of sesame (*Sesamum indicum* L.) under nitrogen fertilizer and weed competition. Journal of Agricultural Science and Sustainable Production 26 (1): 67-81. (in Persian with English abstract).
18. Jefferson, T. 2003. Sesame a High Value Oil Seed. Growing Sesame Production Tips, Economics and Mare.Htm, p. 1-4.
19. Kalavathy, H. M., Regupathib, I., Pillai, M. G., and Miranda, L. R. 2009. Modeling, analysis and optimization of adsorption parameters for H_3PO_4 activated rubber wood sawdust using response surface methodology (RSM). Colloids and Surfaces B: Bionterfaces 70: 35-45.
20. Koocheki, A., Nassiri Mahallati, M., Amiri, M. B., and Fallah Poor, F. 2016.Optimization of nitrogen fertilizer and irrigation in wheat cultivation by central composite design. Journal of Agroecology (in press). (in Persian with English abstract).
21. Koocheki, A., Nassiri Mahallati, M., Moradi, R., and Mansouri, H. 2013.Optimization of water, nitrogen and density in canola cultivation by central composite design. Journal of Agroecology 3 (1): 1-16. (in Persian with English abstract).
22. Kwak, J. S. 2005. Application of taguchi and response surface methodologies for geometric error in surface grinding process. International Journal of Machine Tools and Manufacture 45: 327-341.
23. Laegreid, M., Bockman, O. C., and Kaarstad, O. 1999.Agriculture, Fertilizers, and the Environment. CABI Publishing.
24. Majumdar, D., and Roy, S. 1992. Response of summer sesame to irrigation, row spacing and plant population. Indian Journal of Agronomy 37:758-762.
25. Maman, N., Lyon, D. J., Mason, S. C., Galusha, T. D., and Higgins, R. 2003. Pearl millet and grain sorghum yield response to water supply in Nebraska. Agronomy Journal 95: 1618-1624.
26. Mansouri, H. 2014. Modeling of growth and nitrogen fertilization management in the production of Persian shallot and onion. Ph.D. Thesis, College of agriculture, University of Ferdowsi. Mashhad. Iran. (in Persian with English abstract).
27. Martin, R. J., and Deo, B. 2000. Effect of plant population on calendula (*Calendula officinalis* L.) flower production. New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science 28: 37-44.
28. Mohajer, A. R. 2017. Imports 38 billion dollars of oil and meal over the past 25 years to the country. Interview with the Project Manager of Oil Seeds Project, Ministry of Jihad-e-Agriculture. Mehr news agency. 5 September 2017. (in Persian).
29. Nassiri Mahallati, M., Koocheki, A., Amin Ghafouri, A., and Mahluji Rad, M. 2015. Optimizing corm size and density in saffron (*Crocus sativus* L.) cultivation by central composite design. Journal of Saffron Agronomy and Technology 3 (3): 161-177. (in Persian with English abstract).
30. OseiBonsu, K. 1977. The effect of spacing and fertilizer application on the growth, yield and yield components of sesame. Acta Horticulturae 53: 355-374.
31. Papari Moghaddam Fard, A., and Bahrani, M. J. 2005.Effect of nitrogen fertilizer rates and plant density on some agronomic characteristics, seed yield, oil and protein percentage in two sesame cultivars. Iranian Journal of Agricultural Science 36 (1): 129-134. (in Persian with English abstract).
32. Rezvani Moghaddam, P. 2008. Modern and Neglected Plants. In: Modern Agronomy, Koocheki, A., and Khajeh Hosseini, M. Press of Jihad-e Daneshgahi of Mashhad, Iran. (in Persian)
33. Roy, N., Abdullah Mamun, S. M., and SarwarJahan, M. D. 2009. Yield performance of sesame varieties at varying levels of row spacing. Research Journal of Agriculture and Biological Sciences 5 (5): 823-827.

34. Sharma, P. B. 2005. Fertilizer management in sesame (*Sesamum indicum* L.) based intercropping system in Tawa command area. Journal of Oilseeds Research 22: 63-65.
35. Sharma, P. B., Parshar, R. R., Ambawatia, G. R., and Pillai, P. V. A. 1998. Response of sesame varieties to plant population and nitrogen levels. Field Crop Abstracts 51: 481.
36. Shindo, J., Okamoto, K., Kawashima, H., and Konohira, E. 2009. Nitrogen flow associated with food production and consumption and its effect on water quality in Japan from 1961 to 2005. Soil Science and Plant Nutrition 55: 532-545.
37. Toan, D. P., Thuy-Duong, T. N. A., Carlsson, S., and Bui, T. M. 2010. Morphological evaluation of sesame (*Sesamum indicum* L.) varieties from different origins. Australian Journal of Crop Science 4: 498-504.
38. Wang, J. P., Chen, Y. Z., Ge, X. W., and Yu, H. Q. 2007.Optimization of coagulation–flocculation process for a paper-recycling wastewater treatment using response surface methodology. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects 302: 204-210.
39. Wenxue, L., Long, L., Jianhao, S., Tianwen, G., Fusuo, Z., Xingguo, B., Peng, A., and Tang, C. 2005. Effects of intercropping and nitrogen application on nitrate present in the profile of an Orthic Anthrosol in Northwest China. Agriculture, Ecosystems and Environment 105: 483-491.

Iranian Journal of Field Crops Research
Vol. 17, No. 3, Fall. 2019, p. 427-439

نشریه پژوهشهای زراعی ایران
جلد ۱۷، شماره ۳، پاییز ۱۳۹۸، ص. ۴۳۹ -۴۲۷

Effect of Nitrogen Fertilizer and Plant Density on Seed Yield and Oil Yield of Sesame Using a Central Composite Design

H. Latifi[1], S. Khorramdel[2*], M. Nassiri Mahallati[3], J. Vafabakhsh[4], A. Mollafilabi

Received: 19-05-2018
Accepted: 13-11-2018

Introduction

Sesame (*Sesamum indicum* L.) is known as the king of oil seeds due to the high oil content (50-60%) of its seed. Nitrogen (N) is one of the most important nutrients in crop production systems. Excessive use of N in crop production causes a declining trend in nitrogen use efficiency (NUE). It has been reported that not more than 33% of N applied is used by the plant, while the remainder is lost and causes environmental pollution as well as emission of greenhouse. Optimization of nitrogen and plant density is a management approach to conserve resources and decline environmental pollutions. Response surface methodology (RSM) is defined as a set of mathematical and statistical techniques that are used to develop, to improve or to optimize a product. RSM is a statistical method for optimization of multiple factors which determine optimum process conditions by combining experimental designs. In this work, optimization of nitrogen fertilizer and plant density of sesame using central composite design for Response surface methodology was done.

Materials and Methods

This research was conducted using central composite design with 13 treatments and two replications at the Research Field of Ferdowsi University of Mashhad during the growing season of 2015-2016. The treatments were allocated based on low and high levels of plant density (10 and 40 plants.m^{-2}, respectively) and nitrogen (0 and 100 kg Urea ha^{-1}, respectively). Plant height, yield components, seed yield, biological yield, harvest index, oil percentage, oil yield, protein percentage and, protein yield were calculated as dependent variables and changes of these variables were evaluated by a regression model. Lack-of-fit test was used to evaluate the quality of the fitted model. The adequacy of the model was tested by analysis of variance. In general, the full quadratic polynomial equation was tested to determine the significance of the model and the component of the model (linear, squared, first-order interaction terms). The quality of the fitted model was judged using the determination coefficient (R^2).

Results and Discussion

The results showed that effect of linear component was significant on all studied characteristics. Effect of square component was significant on all studied criteria except harvest index, seed No. per capsule and 1000-seed weight. Interaction effect of full quadratic was significant on plant height, seed No. per plant and protein percentage. Lack of fit test had no significant effect on the studied traits. The full square model for the response variables gave insignificant lack-of-fit indicating that the data of experimental were satisfactorily explained. The highest estimated and observed values of seed yield were obtained for 25 plants.m^{-2} and 50 kg Urea ha^{-1} and 25 plants.m^{-2} and 100 kg Urea ha^{-1} with 1320.5 and 1272.4 kg.ha^{-1}, respectively. The highest estimated values of oil percentage and protein percentage were obtained for 10 plants.m^{-2} and without Urea application (46. 7%) and 40 plants.m^{-2} and 100 kg Urea ha^{-1} kg Urea ha^{-1} (25.3%) and these maximum observed amounts were recorded in 10 plants.m^{-2} and without Urea application (46.5%) and 40 plants.m^{-2} and 100 kg Urea ha^{-1} kg Urea ha^{-1} (25.0%), respectively.

1- PhD Student in Agroecology, Department of Agrotechnology, College of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad
2- Associate Professor, Department of Agrotechnology, College of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad
3- Professor, Department of Agrotechnology, College of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad
4- Assistant Professor, Seed and Plant Improvement Research Department, Khorasan-Razavi Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Mashhad, Iran
5- Assistant Professor, Research Institute of Food Science and Technology, Mashhad, Iran
(*- Corresponding Author Email: khorramdel@um.ac.ir)

Conclusions

The slope of seed yield increased by an increase in density up to 25 plants.m^{-2} and was higher under high levels of N fertilizer (optimum level= 50 kg Urea ha^{-1}) than under low levels, because the plant growth was improved in high amount of N fertilizer and resulted in high yield components and seed yield. Therefore, the effect of plant density on yield improvement could be increased at high levels of N fertilizer which clearly suggest the importance of N for higher seed production in sesame. In general, it seems that resource use optimization based on the central composite design may be suitable cropping approach for sustainable production of sesame.

Acknowledgement

This research was funded by Vice Chancellor for Research of Ferdowsi University of Mashhad, which is hereby acknowledged.

Keywords: Lack-of-fit test, Response surface methodology, Sustainable production